



Magnitudes y Unidades de Protección Radiológica

MsC. Eduardo Carrasco Solis

Exposición

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Exposición es el cociente: $X = \frac{dQ}{dm}$

dQ es la **carga total** de los iones de un solo signo **producidos en aire**, cuando todos los e^- liberados por los fotones absorbidos en la masa dm hayan sido **detenidos completamente** en el seno del aire.

Unidad especial : Roentgen (R).

Unidad del S.I. : Culombio/Kilogramo (C/kg).

Es la exposición producida por un haz de radiación X ó γ que absorbido en 1Kg. de masa de aire seco en **condiciones normales de presión y temperatura**, libera 1 culombio de carga de cada signo.

Relacion entre unidades antiguas y del SI

$$1 \frac{C}{Kg} = 3876R$$

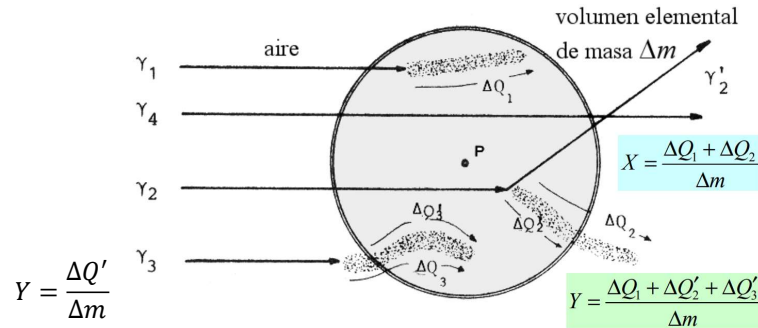
$$1R = 2.58 \times 10^{-4} C/Kg$$

$$1R = 1.61 \times 10^{12} \frac{\text{pares de iones de aire}}{\text{cm}^3}$$

$$1R = 2.08 \times 10^9 \frac{\text{pares de iones}}{\text{cm}^3}$$

Exposición

Valor absoluto de la carga total de los iones de igual signo (ΔQ) producidos en aire cuando **todos los electrones** liberados por los fotones en un volumen elemental de aire de masa Δm se han **detenido en aire**.



Densidad Másica de Carga (Y):

Valor absoluto de la carga total de los iones de igual signo (ΔQ) producidos en aire cuando **todos los electrones** liberados por los fotones en un volumen elemental de aire de masa Δm se han **detenido el volumen elemental**.

Exposición

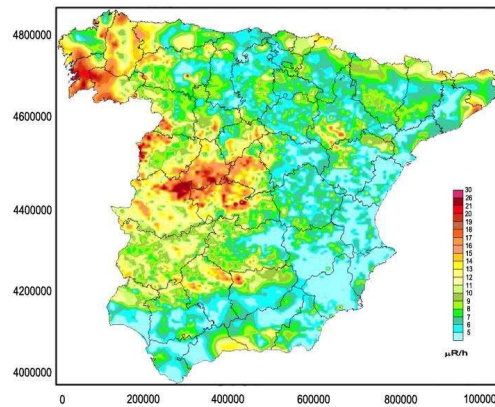
- Se definió la unidad (**Roentgen**) antes que la propia magnitud.
- Hace referencia únicamente **al poder de ionización de la radiación X ó γ en un medio específico (aire)**.
- El efecto medido (ionización en aire) es de **escaso interés** para el estudio de los efectos producidos por las radiaciones **en los tejidos**.
- Existen problemas de medición de la exposición para energías de fotones de unos pocos keV y por encima de varios MeV (difícil mantener en estas situaciones condiciones de equilibrio).
- Es una magnitud de paso hacia la **Magnitud Dosis Absorbida**.
- Dificultad de utilizar la unidad del SI (C/Kg) por su gran dimensión y difícil relación con el Roentgen (R).

Tasa de Exposición

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt}$$

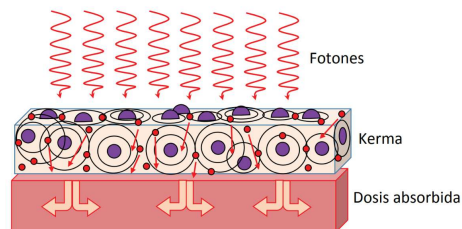
Representa la variación de la exposición dX en un intervalo de tiempo dt

- **Unidad especial :**
 R/s (Roentgen /segundo)
- **Se utilizan submúltiplos :**
 $R/h, mR/h, \mu R/h$
- **Unidad S.I.:**
 $\frac{C}{Kg.s} \left(\frac{\text{Culombio}}{\text{Kilogramo} \cdot \text{Segundo}} \right)$
- Tiene poca utilidad.
- **Ejemplo:** Exposición de la radiación gamma natural medidas a **un metro del suelo** correspondiente a España - MARNA - CSN



Dosis Absorbida (observaciones)

- Es la **magnitud dosimétrica** de mayor interés.
- Hace referencia a la **E. impartida** por la R.I. de cualquier tipo y absorbida en un punto de un material específico.
- El efecto medido es de gran interés para estudios de **radiobiología y protección contra las radiaciones**.
- Fácil relación entre las **unidades antiguas** y las del **S.I.**
- Es una magnitud que se relaciona de forma sencilla con otras magnitudes (**Exposición, Dosis Equivalente, etc.**).
- Es el pilar básico para el cálculo de las **magnitudes limitadoras y operacionales**.



Dosis absorbida

Dosis absorbida es el cociente:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

Donde $d\bar{\epsilon}$ es la energía media impartida por la radiación ionizante y absorbida en una cantidad de masa dm de un material específico.

Unidad especial: Rad.

Unidad del S.I. : Gray (Gy). (J/Kg)

• 1 mGy = 10^{-3} Gy.

• 1 μ Gy = 10^{-6} Gy

Relación entre unidad especial y unidad del S.I.

• 1 Gray = 100 rad

• 1 rad = 10^{-2} Gy = 1 cGy

Tasa de Dosis Absorbida

Variación de las dosis absorbida dD en un punto de un material en un intervalo de dt .

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

Unidad especial: Rad/s.

Se utilizan sub múltiplos
rad/h ; m rad/h

Unidad del S.I. : Gy/s

• Se utilizan sub múltiplos

• mGy/h ; μ Gy/h

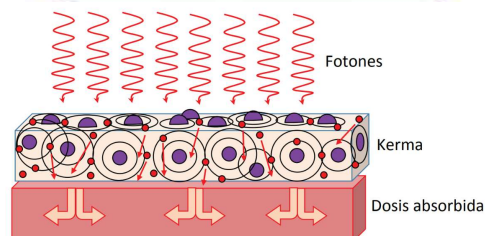
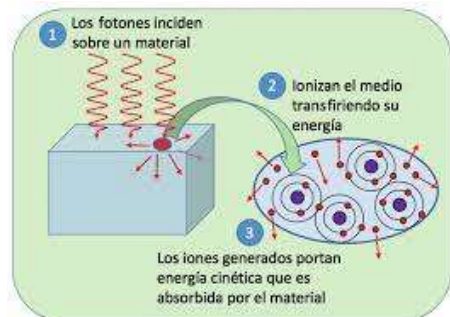
Magnitudes de las radiaciones

Dosis absorbida D

- La cantidad de energía transferida por unidad de masa en un material blanco
- Aplicable a cualquier radiación
- Se mide en gray (Gy) = 1 joule/kg
- La antigua unidad rad = 0.01 Gy

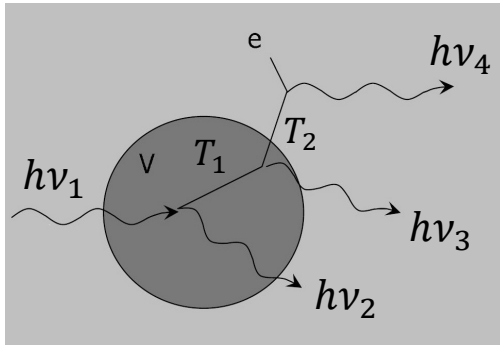
$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$



Ejemplo

Fotón con scattering Compton en un punto del volumen V



Energía impartida

$$E_i = h\nu_1 - (h\nu_2 + h\nu_3 + T_2)$$

Energía transferida

$$E_{tr} = h\nu_1 - h\nu_2 = T_1$$

Energía transferida neta

$$E_{tr}^n = h\nu_1 - h\nu_2 - h\nu_3 - h\nu_4$$

$$E_{tr}^n = T_1 - h\nu_3 - h\nu_4$$

Obsérvese que la energía radiada incluso fuera del volumen V se sustrae en la energía neta transferida.

Relación entre Exposición y Dosis Absorbida

- *Energía para la producción de un par de iones: 34 eV* $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{J}$
- *1R produce 1.61×10^{12} pares de iones en 1 g de aire.*

$$1.61 \times 10^{12} \frac{\text{pares}}{\text{g}} \times 34 \frac{\text{eV}}{\text{par}} \times 1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} = 87.7 \times 10^{-7} \frac{\text{J}}{\text{g}} = 87.7 \times 10^{-4} \text{Gy}$$

En aire:

$$1\text{R} \Rightarrow 0.877 \times 10^{-2} \text{Gy} = 0.877\text{rad}$$

$$D_{\text{aire}} (\text{rad}) = 0.877X(\text{R})$$

$$D_{\text{aire}} (\text{Gy}) = 87.7 \times 10^{-4}X(\text{R})$$

Para otro medio que no sea aire:

$$D(\text{rad}) = f X(\text{R})$$

El factor f depende del absorbente.

$$D_{\text{tejido blando}} (\text{rad}) = 0.93X(\text{R})$$

Por lo que es costumbre en Radioprotección hacer una estimación conservativa de la dosis absorbida a partir de la exposición en roentgen:.

$$D(\text{rad}) \approx X(\text{R})$$

Relación entre Exposición y Dosis Absorbida

$$D = fX$$

D = Dosis Absorbida en un punto de un material.

X = Exposición.

f = Factor de Relación entre X y D .

- f esta tabulado por distintos materiales y energía
- f es aproximadamente 1 para todas las energías cuando el material irradiado es tejido blando y se utilizan las unidades antiguas (rad, R)

Factor f que relaciona DOSIS ABSORBIDA con EXPOSICIÓN para FOTONES de energías desde 10 keV a 2 MeV en condiciones de equilibrio

Energía de fotones (keV)	Dosis absorbida/exposición					
	Agua		Hueso		Músculo	
	Gy kg/C	rad/R	Gy kg/C	rad/R	Gy kg/C	rad/R
10	35,4	0,914	135	3,48	35,8	0,925
15	35,0	0,903	150	3,86	35,8	0,924
20	34,7	0,895	158	4,09	35,8	0,922
30	34,4	0,888	165	4,26	35,7	0,922
40	34,5	0,891	157	4,04	35,9	0,925
50	35,0	0,903	137	3,53	36,1	0,932
60	35,6	0,920	113	2,91	36,5	0,941
80	36,7	0,946	75,4	1,94	36,9	0,953
100	37,2	0,960	56,2	1,45	37,2	0,960
150	37,6	0,971	41,3	1,065	37,4	0,964
200	37,7	0,973	38,1	0,982	37,4	0,965
300	37,8	0,974	36,6	0,944	37,4	0,966
400	37,8	0,974	36,3	0,936	37,4	0,966
500	37,8	0,975	36,2	0,933	37,4	0,966
600	37,8	0,975	36,1	0,932	37,4	0,966
800	37,8	0,975	36,1	0,931	37,4	0,966
1000	37,8	0,975	36,1	0,931	37,4	0,966
1500	37,8	0,975	36,0	0,930	37,4	0,966
2000	37,8	0,974	36,1	0,931	37,4	0,965

Transferencia Lineal de Energía (LET, L_{Δ})

$$L = \frac{dE}{dl}$$

Es la **energía disipada** por una partícula cargada al atravesar una longitud dl en todas aquellas colisiones con e^- en las que se realiza una pérdida de energía.

Unidad del S.I. : J/m

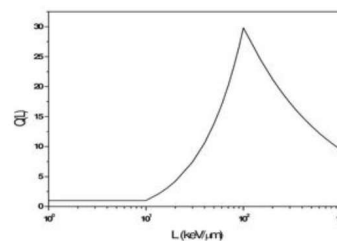
Otras unidades: keV/ μ m, eV/m, MeV/m

Consideraciones generales:

El LET tiene gran importancia en la Radiobiología y Radioprotección, pues sirve de base para el cálculo de los factores que ponderan la calidad de radiación en la evaluación del daño biológico.

ES LA MAGNITUD DE PASO A LA DOSIS EQUIVALENTE

Factor de Calidad Q en función del LET

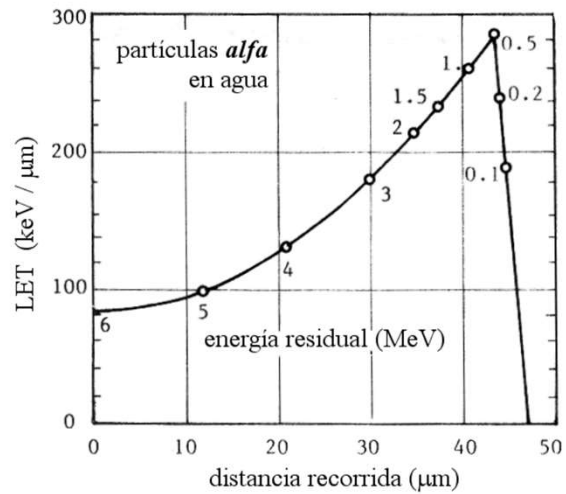


Transferencia Lineal de Energía (LET)

$$LET = \left(-\frac{dE}{dx} \right)_{\text{Colisiones}}$$

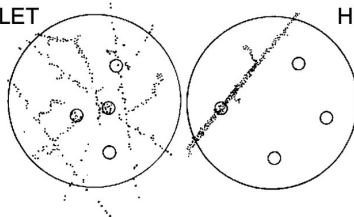
La LET esta ligada a los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes

rayos γ de Co-60	0,2-2	keV / μm
Rayos X de 3 MeV	0,3	keV / μm
electrones de 1 MeV	0,25	keV / μm
electrones de 1 keV	12,3	keV / μm
partículas pesadas cargadas	100-200	keV / μm



Transferencia Lineal de Energía (LET)

Low LET

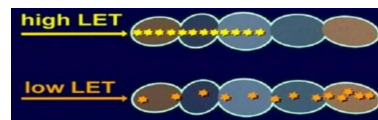
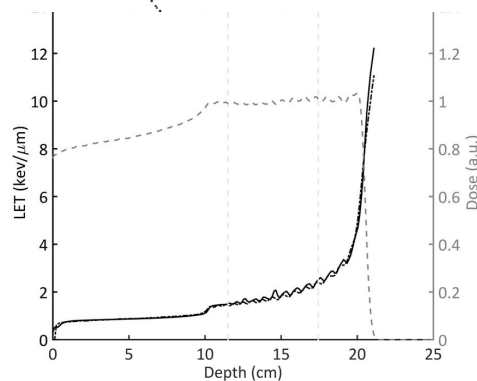


High LET

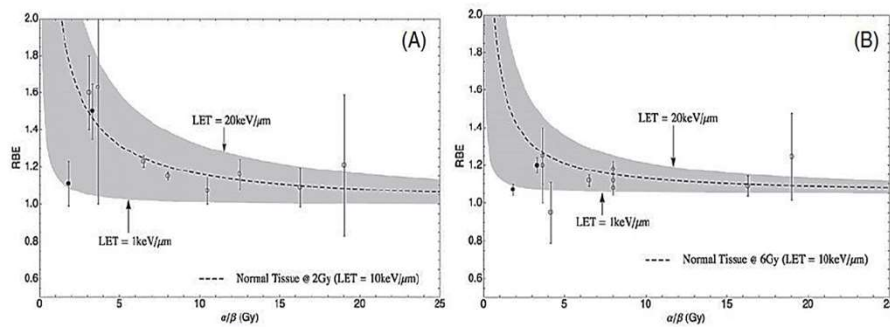
En general, a mayor LET las ionizaciones se **concentran** y producen daños más letales e irreparables en el ADN.

La **eficacia biológica** de una radiación está relacionada con su transferencia lineal de energía (LET) que determina qué **densidad de ionización produce**.

La LET de los protones aumenta al reducirse su energía, y por tanto aumenta conforme estos penetran en el medio.



Transferencia Lineal de Energía (LET)



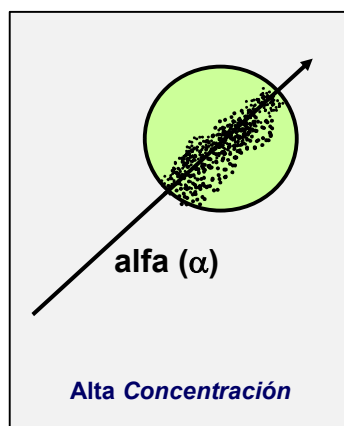
La RBE depende del tipo de tejido.

- En los tejidos muy proliferativos (tumores, p.ej. con alfabeto alto) la RBE toma valores menores **que 1.1**
- En tejidos sanos (poco proliferativos y alfabeta bajo) puede llegar a ser mayor de **1.5**.

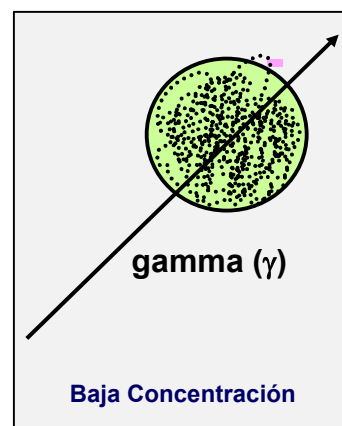
Radiaciones diferentes - Dosis iguales

Pero ...

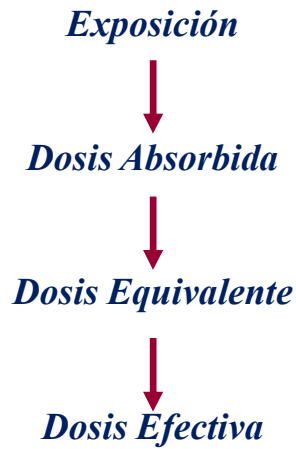
**Distintas Micro Concentraciones de Iones
DIFERENTES EFECTOS**



**Igual
Cantidad
de Iones**



De Gy a Sv: Magnitudes y unidades de las radiaciones

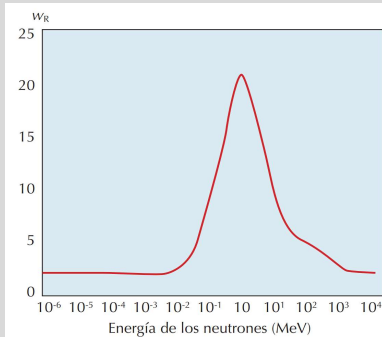


Magnitudes de las radiaciones

Dosis Equivalente H

- Tiene en consideración el efecto de las radiaciones sobre el tejido, empleando un coeficiente de ponderación de las radiaciones w_R
- Se mide en sievert (Sv)
- La antigua unidad rem = 0.01 Sv

$$H = D \times w_R$$



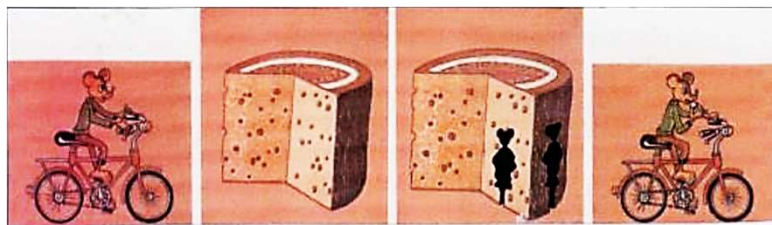
Curva de valores de w_R en función de la energía de los neutrones.

Coeficientes de ponderación por tipo de radiación (ICRP 60)

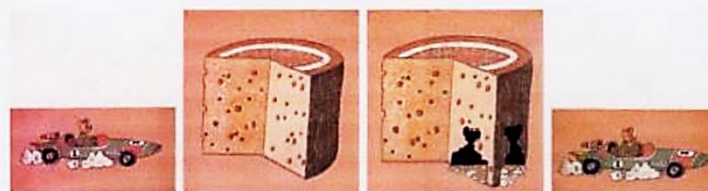
<i>Tipo de Radiación</i>	<i>W_R</i>
Beta	1
Alpha	20
Rayos X	1
Rayos gamma	1
Neutrones <10 keV	5
Neutrones (10 keV – 100 keV)	10
Neutrones (100 keV – 2 MeV)	20
Neutrones (2 MeV – 20 MeV)	10
Neutrones >2 MeV	5

La 'efectividad radiobiológica' para diferentes tipos de radiaciones depende del último aspecto visto. Los valores del ICRP dados en la diapositiva anterior **aplican solo para efectos estocásticos**.

Dosis Equivalente H

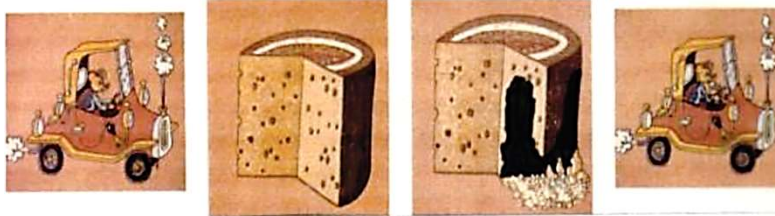


FOTONES Y ELECTRONES DE TODAS LAS ENERGÍAS $W_R = 1$



NEUTRONES ENERGÍA < 10 KeV Y PROTONES ENERGÍA > 2 MeV $W_R = 5$

Dosis Equivalente H



NEUTRONES ENERGÍAS DE 10 A 100 KeV Y DE 2 A 20 MeV $W_R = 10$



PARTÍCULAS ALFA CON ENERGÍAS ENTRE 100 KeV Y 2 MeV $W_R = 20$

Ejercicio

¿Por qué es 1 mGy de radiación alfa considerado más dañino al tejido que 1 mGy de radiación beta?

$$W_{R\alpha} = 20$$

$$W_{R\beta} = 1$$

Solución

$$H_{\alpha} = 1 (10^{-3}) \times 20 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 20 \text{ mSv}$$

$$H_{\beta} = 1 (10^{-3}) \times 1 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 1 \text{ mSv}$$

$$H_{\alpha} = 20 \text{ mSv}$$

$$H_{\beta} = 1 \text{ mSv}$$

- 1 mGy de radiación α produce al tejido una dosis equivalente de 20 mSv.
- 1 mGy de radiación β produce al tejido una dosis equivalente de 1 mSv.

Un tejido absorbe 2mGy de radiación γ y 1mGy de radiación α . ¿Cuál es su dosis equivalente?

Solución

$$H = (D_1 \times w_{R1}) + (D_2 \times w_{R2})$$

$$H = (2\text{mGy} \times 1) + (1\text{mGy} \times 20)$$

$$H = 22\text{mSv}$$

Ejercicio

Calcule la dosis equivalente total al tejido proveniente de dosis separada de 3 mGy de gamma, 0.6 mGy de neutrones de 100 KeV y 1 mGy de radiación beta.

Solución

$$W_{R\gamma} = 1$$

$$W_{Rn} = 10$$

$$W_{R\beta} = 1$$

$$H_{\gamma} = 3 (10^{-3}) \times 1 = 3 \cdot 10^{-3} Sv = 3 mSv$$

$$H_{\alpha} = 3 mSv$$

$$H_n = 0.6 (10^{-3}) \times 10 = 6 \cdot 10^{-3} Sv = 6 mSv$$

$$H_n = 6 mSv$$

$$H_{\beta} = 1 (10^{-3}) \times 1 = 1 \cdot 10^{-3} Sv = 1 mSv$$

$$H_{\beta} = 1 mSv$$

$$H_{Total} = H_{\gamma} + H_n + H_{\beta} = 10 mSv$$

$$H_{Total} = 10 mSv$$

Magnitudes de las Radiaciones

Dosis Efectiva E

- Toma en cuenta las diversas sensibilidades de los diferentes tejidos ante las radiaciones empleando **Factores de Ponderación para Tejido w_T**
- Se mide en sievert (Sv)
- Se emplea cuando se irradian varios órganos a dosis diferentes, o a veces cuando un órgano se irradia por separado

- **w_T y w_R son independientes**

Los factores de riesgo para los distintos tejidos (w_T) son independientes del tipo de radiación (w_R).

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_R w_R \sum_T w_T D_{T,R}$$

$$E = \sum w_T D_{T,R}$$

Coeficientes de ponderación por tejido (ICRP 60)

<i>Tejido</i>	<i>W_T</i>
<i>Gónadas</i>	<i>0.2</i>
<i>Médula ósea (roja)</i>	<i>0.12</i>
<i>Colon</i>	<i>0.12</i>
<i>Pulmón</i>	<i>0.12</i>
<i>Estómago</i>	<i>0.12</i>
<i>Vejiga</i>	<i>0.05</i>
<i>Mama</i>	<i>0.05</i>
<i>Hígado</i>	<i>0.05</i>
<i>Esófago</i>	<i>0.05</i>
<i>Tiroides</i>	<i>0.05</i>
<i>Piel</i>	<i>0.01</i>
<i>Superficies óseas</i>	<i>0.01</i>
<i>Resto</i>	<i>0.05</i>
<i>TOTAL</i>	<i>1.00</i>

- Los conceptos dados de dosis efectiva y de coeficientes de ponderación por tejido son solo de **aplicación a los efectos estocásticos**.
- La dosis efectiva es una **cuantificación de riesgo**.

Ejercicio

Calcular la dosis efectiva producida en un individuo que se ha expuesto a 20 mSv de radiación y en todo el cuerpo.

Solución

$$H = 20 \text{ mSv}$$

$$W_T = 1(\text{todo el cuerpo})$$

$$E = 20 (10^{-3}) \times 1 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ Sv} = 20 \text{ mSv}$$

$$E = 20 \text{ mSv}$$

Magnitudes de las radiaciones

Radiografía de cráneo
(suponiendo Dosis de entrada AP =5 mGy / L =3 mGy)

Órgano	Dosis (mGy)	
	Cráneo AP	Cráneo L
Médula ósea	0.4	0.2
Pulmón	0.2	0.06
Tiroides	2.1	1.75
Cerebro	1.4	1.05

Tejido	W_T
Gónadas	0.2
Médula ósea (roja)	0.12
Colon	0.12
Pulmón	0.12
Estómago	0.12
Vejiga	0.05
Mama	0.05
Hígado	0.05
Esófago	0.05
Tiroides	0.05
Piel	0.01
Superficies óseas	0.01
Resto	0.05
TOTAL	1.00

$$E_{AP} = (0.4 \times 0.12) + (0.2 \times 0.12) + (2.1 \times 0.05) + (1.4 \times 0.05)$$

$$E_{AP} = 0.247mSv$$

$$E_L = (0.2 \times 0.12) + (0.06 \times 0.12) + (1.75 \times 0.05) + (1.05 \times 0.05)$$

$$E_L = 0.171mSv$$

$$E = E_{AP} + E_L = 0.247mSv + 0.171mSv = 0.42mSv$$

$$E = 0.42mSv$$

Magnitudes de las Radiaciones

Radiografía Intraoral y Ortopantomografía

Órgano	Dosis (mGy)	
	Intraoral	Ortopantom.
Gónadas	0.001	< 0.005
Médula ósea	0.012	0.050
Pulmón	0.001	0.010
Tiroides	0.005	0.070
Mama	0.005	0.010
Sup. Ósea	0.060	0.200
Cerebro	0.050	0.500

Tejido	W_T
Gónadas	0.2
Médula ósea (roja)	0.12
Colon	0.12
Pulmón	0.12
Estómago	0.12
Vejiga	0.05
Mama	0.05
Hígado	0.05
Esófago	0.05
Tiroides	0.05
Piel	0.01
Superficies óseas	0.01
Resto	0.05
TOTAL	1.00

$$E_1 = (0.001 \times 0.20) + (0.012 \times 0.12) + (0.001 \times 0.12) + (0.005 \times 0.05) + (0.005 \times 0.05) + (0.060 \times 0.01) + (0.050 \times 0.05)$$

$$E_1 = 0.003mSv$$

$$E_o = (0.005 \times 0.20) + (0.050 \times 0.12) + (0.010 \times 0.12) + (0.070 \times 0.05) + (0.010 \times 0.05) + (0.200 \times 0.01) + (0.500 \times 0.05)$$

$$E_o = 0.039mSv$$

$$E = E_1 + E_o = 0.003mSv + 0.039mSv = 0.042mSv$$

Ejercicio

Un haz de rayos X produce 4 uec de carga en 0,08 g de aire ¿Cuál será la exposición (X) en mR y en las unidades del sistema internacional?

Solución

Según la definición de Röntgen (R), equivale a liberar 1 uec (unidad electrostática de carga) en 1 cm^3 aire. Como 1 cm^3 de aire, en condiciones normales de presión y temperatura contiene 0,001293 g,

$$1R = \frac{1\text{uec}}{0,001293 \text{ g}} = 773,4\text{uec/g}$$

Con los datos del enunciado

$$X = \frac{4\text{uec}}{0,08 \text{ g}} = 50\text{uec/g} = \frac{50}{773,4}R = 0,0646R = 64,6\text{mR}$$

Para pasarlo a unidades del sistema internacional

$$1\text{uec} = 3,34 \cdot 10^{-10}\text{C} \quad \Rightarrow \quad X = 50 \frac{3,34 \cdot 10^{-10} \text{ C}}{10^{-3} \text{ kg}} = 1,67 \cdot 10^{-5}\text{C/kg}$$

Ejercicio

Se tiene una tasa de dosis absorbida de **2rad/h** ¿A qué tasa de dosis equivalente en Sv/s corresponde? Para Contaminación por Agentes Físicos (a) Rayos gamma (b) Rayos beta (c) Rayos alfa

Solución

Sabemos que $\dot{H} = Q \times \dot{D}$

(a) Para rayos gama $Q = 1$

$$\dot{H} = 2\text{rem/h} \quad 1\text{ Sv} = 100\text{rem} \rightarrow 1\text{rem} = 10^{-2} \text{ Sv} \quad 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$\dot{H} = 2 \times 10^{-2} \text{ Sv}/3600 \text{ s} = 5,5 \times 10^{-6} \text{ Sv/s} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{H} = 5,5\mu\text{Sv/s}}$$

(b) Para radiación beta $Q = 1$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\dot{H} = 5,5\mu\text{Sv/s}}$$

(c) En el caso rayos alfa $Q = 20$, por lo que el resultado es

$$\dot{H} = Q \times \dot{D} = 20 \times 2\text{ram/h} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\dot{H} = 40\text{rem/h} = 0,11\text{mS/s}}$$